TITLE:

Hidden order and exotic
superconductivity in the heavy-
fermion compound URu₂Si₂(
Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Okazaki, Ryuji

CITATION:

Okazaki, Ryuji. Hidden order and exotic superconductivity in the heavy-fermion compound URu₂Si₂. 京都大学, 2013, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2013-03-25

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/175161>

RIGHT:

京都大学	博士（理学）	氏名	岡崎 竜二
論文題目	Hidden order and exotic superconductivity in the heavy-fermion compound URu ₂ Si ₂ （重い電子系化合物 URu ₂ Si ₂ における隠れた秩序とエキゾチック超伝導）		
(論文内容の要旨)			
<p>ある種の希土類やアクチノイド化合物においては、高温で局在していた f 電子が近藤効果を呼ばれる伝導電子と混成効果により、低温で遍歴性をもってコヒーレントに動き始める。このとき f 電子の特徴を持つ伝導電子は、自由電子の数 10 倍から数百倍の有効質量を持ち重い電子（ヘビーフェルミオン）と呼ばれる。重い電子系化合物は、電子相関、磁性、非フェルミ流体、エキゾチック超伝導といった興味ある量子多体問題の宝庫であり、これまで膨大な研究が行われてきた。本論文で主として研究が行われた URu₂Si₂ は約 30 年前に発見された重い電子化合物である。URu₂Si₂ は正方晶の結晶構造を持ち、17.5 K の温度において大きな比熱の飛びを伴う 2 次相転移を示した後、2 K において超伝導転移を示す。本論文では日本原子力研究所で作製された URu₂Si₂ の超純良単結晶を用いて、17.5 K における相転移と 2 K 以下の超伝導状態に関する研究を行っている。</p> <p>まず本論文の前半では、この物質の最も大きな謎である 17.5 K における 2 次相転移に関する研究を行っている。一般に 2 次相転移により何らかの対称性が破れた秩序相に転移する。しかしながら URu₂Si₂ においては相転移温度以下で磁気秩序も構造相転移も観測されおらず、どのような秩序相にあるのか全くわかっていないためこの転移温度以下の相は「隠れた秩序」相と呼ばれていた。したがって相転移温度以下でどのような対称性が破れているかを明らかにすることが、この隠れた秩序相の解明につながる。岡崎氏はマイクロカンチレバーシステム、ベクトル型超伝導 磁石、およびクライオスタット精密回転システムを用いて、微小単結晶の磁化の異方性を様々な磁場の方向で超高感度測定できる磁気トルクの測定装置を開発し、隠れた秩序相における磁気異方性の精密測定を行った。磁気トルクは、面内で 4 回対称性を持つ正方晶の結晶構造の系では、磁場を面内で回転させても磁気トルクの角度依存性に 2 回対称性は原理的に出てこない。岡崎氏は、隠れた秩序相以上の温度では、2 回対称性を持つ角度成分は現れないが、隠れた秩序相に入ると明確な 2 回対称性が観測されることを発見した。このことは隠れた秩序相では結晶の 4 回対称性を破る電子状態が実現していることを世界ではじめて示したことを意味している。これは、隠れた秩序相において「電子ネマティック状態」という特異な電子状態が実現していることを明らかにしたものであり、隠れた秩序相において何の対称性が破れているかという 4 半世紀の謎を解明する手がかりを与えるものである。</p> <p>さらに本論文の後半では、隠れた秩序下で起こる超伝導状態の研究も行われている。先行研究により URu₂Si₂ では従来の BCS 超伝導とは異なる超伝導対称性を持った状態が実現していることが明らかになっていた。特に時間反転対称性を破ったカイラル d 波対称性をもつ超伝導状態が先行研究で提唱されており、その超伝導状態は特異なものであることが予想されている。岡崎氏は、フランスのエコールポリテクニークのグループとの共同研究で、微小ホール素子を用いて試料の様々な場所での局所磁場を測定することにより、この系の下部臨界磁場の精密測定を行った。その結果磁場を ab 面に平行にかけたときに、超伝導転移温度以下で下部臨界磁場の温度依存性にキंक構造が現れるという異常を発見した。岡崎氏はこれに対して、カイラル d 対称性の超伝導状態に伴うエネルギー縮退が何らかの理由に解けたことにより、2 つの超伝導転移が現れ特異な磁束量子のダイナミクスが現れた可能性を指摘した。さらに岡崎氏は、本研究で用いた超純良単結晶では磁束格子が融解し液体状態に転移することを発見した。結晶中に欠陥等の少ないクリーンな超伝導体に磁場をかけると磁束量子が周期的に並んだ磁束格子状態が実現されるが、低次元性が強く高い転移温度を持つ銅酸</p>			

化物高温超伝導体等では、熱揺らぎの効果により磁束格子が融解して液体状態になることが知られていた。岡崎氏は熱伝導度と電気抵抗の系統的な測定によりこのような磁束格子融解現象が、 URu_2Si_2 のような非常に超伝導転移温度の低い物質でも明確に観測されることを示した。この起源として URu_2Si_2 では電子が重くキャリア数が通常の超伝導体よりも一桁近く小さいことにより、熱揺らぎの効果が増強されることに由来することを指摘した。

本論文は、6 章からなる。2 章においてこれまでの URu_2Si_2 における隠れた秩序相と超伝導状態に対する先行研究について簡潔にまとめられている。3 章において隠れた秩序相における精密トルク測定についての結果とその解釈についての議論がなされている。また岡崎氏の論文出版後大きく進んだ URu_2Si_2 の隠れた秩序相に関する理解の発展についても記述されている。4 章では、微小ホール素子を用いた局所磁場測定による、下部臨界磁場の測定方法とその結果、および解釈について議論されている。またこの測定装置を用いて、最近発見された鉄系高温超伝導体 PrFeAsO_{1-y} に対する下部臨界磁場の測定結果についても報告されている。5 章では URu_2Si_2 における磁束格子融解現象に対する実験結果とその解釈についての議論がなされている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文で研究された URu_2Si_2 は 17.5 K の温度で隠れた秩序状態と呼ばれる相に 2 次相転移を起こす。隠れた秩序相は発見されてから 4 半世紀が経過するが、どのような対称性が破れた秩序相が実現されているのか謎でありこれまで膨大な研究が行われている。岡崎氏は精密な磁気異方性測定装置を自ら開発し、隠れた秩序相において正方晶結晶の 4 回対称性を破るネマティック電子状態が実現されていることを発見した。この結果は、隠れた秩序における秩序変数は何かという長年の謎を解明する大きな手がかりを与えるものであり高く評価される。岡崎氏の発見は、それまで提唱されていた数多くの隠れた秩序に対する理論モデルに対し強い制限を与えただけでなく、この発見の説明を試みた多くの新しい理論モデルも現れておりインパクトの大きさがうかがわれる。

また岡崎氏の行った URu_2Si_2 の超伝導状態の研究は、この系の超伝導の特異性を解明したものである。まず下部臨界磁場の測定結果は、この系の超伝導波動関数の縮退が解け超伝導転移温度が 2 つに分裂している可能性を示すものである。この現象を解明するにはさらなる実験が必要であるが、エキゾチックな超伝導状態の可能性を指摘した本結果は高く評価される。また磁束格子の研究では、このような低温においても磁束格子の融解現象が起こりうることを示したという点で非常にユニークな研究であるといえる。実際これらの研究はすべて、世界でもトップクラスの学術誌に岡崎氏が筆頭著者として掲載されている。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。平成 24 年 12 月 27 日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。審査会では関連する研究の学識に関する質疑応答もし、その結果合格と認めた。また、外国語の学力については、本論文が英語で書かれていること、これまでに第一著者で英語の論文を数多く発表していること、及び英語による海外での講演をしていることなどから優秀と認められたため学力試験を免除した。